經由碳平衡及二氧化碳通量之量測推估蝴蝶蘭園之最佳溫度及光照條件

姚銘輝*、陳俊仁、黃國祥
行政院農委會農業試驗所農業工程組

摘要

本研究目的為利用渦流共變異數技術量測二氧化碳通量之日碳平衡，以評估蝴蝶蘭園最佳溫度及光照條件，其結果將有助於在溫室栽培之蘭花管理。結果顯示，日/夜溫為25/25℃可得葉片之最高日碳平衡，而由整個園區尺度之碳通量資料，最佳蘭園溫度範圍為 24-27℃之間。由整年通量量測資料，日均溫與日碳平衡之相關係數為 0.65，然而，夜溫與二氧化碳固定較日溫與呼吸作用更顯著。景天科作物之光反應及暗反應是分開進行，最佳光照利用碳平衡及葉綠素螢光參數量測所得結果為 300-500 μmol m^{-2} s^{-1}。除此之外，每日之日夜 1 個循環較 2 個及 3 個循環有更多碳固定量。潛熱與溫度及光度相關性皆不明顯，主要原因為水牆風扇干擾溫室內水汽狀態所致。

關鍵詞：蝴蝶蘭、景天酸代謝、碳平衡、二氧化碳通量、溫室。

Estimating Optimum Temperature and Light Intensity for Orchid of *Phalaenopsis* from the Measurements of Carbon Dioxide Flux and Daily Carbon Balance

Ming-Hwi Yao*, Chun-Jen Chen and Guo-Sheng Huang

Agricultural Engineering Division, Taiwan Agricultural Research Institute, Wufeng, Taichung 41362, Taiwan ROC

ABSTRACT

The main objectives of this study were to evaluate the conditions of best temperature and light intensity of greenhouse/structure growing *Phalaenopsis* by the measurement of daily carbon balance with CO_2 flux using eddy covariance technique for the purpose of improving orchid management in greenhouse cultivation. The results indicated that the maximum carbon balance can be reached at the day/night temperature of 25/25℃ on leaf basis, and in range of 24-27℃ on the base of greenhouse as a whole. The correlation coefficient between daily mean temperature and carbon balance was 0.65, calculated by annual eddy flux data. The relationship between night temperature and CO_2 fixation was stronger than day temperature and respiration. The light and dark reactions of carbon fixation for crassulacean acid metabolism (CAM) plant were separated. The suitable light intensity range for *Phalaenopsis* leaves was 300-500 μmol m^{-2} s^{-1} from the measurements of daily carbon balance and fluorescence parameters. In addition, higher daily carbon balance occurred in 1 day/night cycle per day (148.3 μmol CO_2 m^{-2} day^{-1}) compared with 2 cycles (127.1 μmol CO_2 m^{-2} day^{-1}) and 3 cycles (92.4 μmol CO_2 m^{-2} day^{-1}). Latent heat was not significantly correlated with temperature and light intensity because the pad-fan interfere the vaporing of water in greenhouse.

Key words: *Phalaenopsis,* Crassulacean acid metabolism (CAM), Carbon balance, CO_2 flux, Greenhouse.

---

* 通信作者, mhyao@ tari.gov.tw
投稿日期：2011 年 7 月 14 日
接受日期：2011 年 9 月 28 日
作物、環境與生物資訊 8:172-180 (2011)
Crop, Environment & Bioinformatics 8:172-180 (2011)
189 Chung-Cheng Rd., Wufeng, Taichung 41362, Taiwan ROC

前言

作物生理研究常以單葉或單株為測量尺度，而農田或溫室尺度評估則藉由單株研究結果及氣象資料做推估，但尺度不同易造成推估結果無法反應實際現況(McGinn and King 1990)。通量量測系統是大面積作物生育監測的工具，廣泛用於農田之蒸發散量測(Zhang *et al.* 2007)，潛熱或可感熱的傳送(Ortega-Farias *et al.* 2006)及二氧化碳吸存量評估(Amiro *et al.* 2010)等工作。

我國蝴蝶蘭栽培自 1980 年代起，後來轉型成為專業蘭園，並引進更具氣候環境適應性之規格化蝴蝶蘭栽培溫室。此種精密溫室夏天透過遮光網、風扇及水牆的運轉可將溫度控制在 30℃以下，冬天透過加溫及保溫設備可使溫度維持在 22℃以上，將溫度併濕度和光照控制在適宜蝴蝶蘭生長的環境內。同時，有關蝴蝶蘭生理、栽培、肥料管理及病蟲害防治皆有廣泛研究，促使蝴蝶蘭成為我國之重點發展產業。蝴蝶蘭屬於景天酸代謝(crassulacean acid metabolism; CAM)植物，不同於 C_3 及 C_4 型植物之生理特性，其中白天氣孔關閉以減少蒸散，夜間行固碳作用之暗反應。有關於蝴蝶蘭光合作用特性及與氣象因素(尤其是溫度及光度)的交感已有相當多研究 (Ota *et al.* 1991, Guo and Lee 2006, Ichihashi *et al.* 2008)，惟多屬單株或單葉的研究。Field and Ehleringer (1993)指出尺度規模由單葉至植冠或更大面積的表現，並非是線性關係，同時作物生理參數間之回饋機制需釐清，然而目前缺少以大面積溫室栽培尺度探討蝴蝶蘭固碳與環境關係的研究資料。

光照是影響葉片光合作用之重要因子，但 CAM 型作物特性光合作用之光反應及暗反應並非同時進行，如此一來增加了探討葉片二氧化碳吸收的複雜度。葉綠素螢光是測量光反應常用的方法，尤其是針對低光或高光逆境的探討(Borkowska 2006)。葉綠素螢光之不同參數可依據黑暗及照光條件，由葉片螢光釋放量(Fo, Fo')及飽和光源照射後之螢光量(Fm, Fm')計算獲得(Roháček 2002)。螢光參數可運用在葉片光合作用研究上，尤其是蝴蝶蘭此種景天酸代謝作物(Lin and Hsu 2004）。

栽培溫室有控溫系統，如水牆、風扇及加溫器等設備，所提供作物栽培環境不同於農田狀況，雖然通量技術常用於農田評估，但用於溫室研究仍甚少，但只要符合通量量測基本要求所測得資料即有代表性。本研究中將蝴蝶蘭每日對二氧化碳的吸收及排放淨值稱為碳平衡(carbon balance)，利用通量量測技術量測蝴蝶蘭園周年二氧化碳及潛熱通量(latent heat flux)變化，並以碳平衡為指標，探討溫室環境對蝴蝶蘭營養期生育之影響，以提供栽培業者栽培管理的參考。

材料與方法

一、田間作物栽培

觀測地點位於彰化縣芬園鄉蝴蝶蘭溫室，溫室為寬 6 m，長 20 m 及高 4.5 m，具有水牆風扇之塑膠布溫室，以植床方式種植蝴蝶蘭，此商業用溫室所栽培品種較為混雜，但整個蝴蝶蘭園植冠(canopy)平整，栽培管理依一般慣行方式。

通量系統架設於蝴蝶蘭園中央位置，所架設儀器包括三維音波風速計(three dimensional sonic anemometer；Young 81000, R.M.Young company, MI, USA)，輸出頻率為 4-32 Hz；開放式二氧化碳/水汽分析儀(open path CO_2/H_2O analyzer；LICOR-7500, LI-COR, Inc., NE, USA)，最高反應頻率為 20 Hz；細熱電偶線(fine wire thermocouple)，線徑為 12.7 μm，反應頻率大於 30 Hz；淨輻射計(net radiometer；REBS Q7.1, Campbell Scientific, Inc., UT, USA)。所有感測器連接於 Campbell CR1000 資料蒐集器，系統程式依 Campbell 公司所提供加以修改，資料取樣頻率為 10 Hz，每 10 min 儲存一次資料。程式中有關 CO_2 通量及潛熱

(latent heat)通量計算，係依據 Yao *et al.* (2003)所列之公式計算。

二、光合作用速率及蒸散速率量測

葉片日碳平衡研究是以光合作用分析儀(Model 6400 Licor, Inc., Lincoln, NE, USA)量測蝴蝶蘭葉片光合作用速率數值，試驗在大型生長箱(內徑長 × 寬 × 高 = 2 m × 2 m × 2 m)內進行，相對溼度設定為 70%，溫度由箱體控制系統設定，精確度為±1℃，光源為可控制光照強度之 LED 燈組(Model 6400-02B, Licor, Inc., Lincoln, NE, USA)，光質分別為藍光(470 nm ± 10 nm)及紅光(665 nm ± 10 nm)。日碳平衡量測方式是以 24 h 為單位，24 h 內不同照光循環處理，累加整日之二氧化碳淨值(包含光合作用及呼吸作用)為碳平衡數值。

三、蝴蝶蘭葉片之葉綠素螢光量測

將所欲測量葉片置於葉綠素螢光測定儀(chlorophyll fluorometer, MINI-PAM, Heinz Walz, Germany)的偵測器(sensor head)上，同時儀器包括測定瞬間光照強度及葉溫，所得資料由儀器下載至電腦分析。螢光參數之定義依據 Roháček (2002) 所述，qP 及 qN 分別定義為 (Fm′-F)/(Fm′-Fo′) 及 (Fm-Fm′)/(Fm-Fo)，Fm 及 Fm'分別為黑暗及飽合光照下之最大螢光量，Fo 及 Fo'則為黑暗及照光下之最小或起始螢光量。電子傳遞速率(electron transfer rate; ETR)由螢光參數乘以光合作用有效輻射(photosynthetically active radiation; PAR) 及係數，其計算式如下：

$$ETR = (Fm' - Fo/Fm) \times PAR \times 0.5 \times 0.84 \quad (1)$$

其中 Fm′-Fo/Fm 為光化學產量(photochemical yield)；PAR 單位為 μmol quanta m^{-2} s^{-1}；0.5 為傳遞一個電子需吸收 2 光量子(quanta)；0.84 是作物葉片吸收光量子之係數(Genty *et al.* 1989)。

結果

溫室設施內溫度影響蝴蝶蘭的光合作用能力，Fig. 1 為探討蝴蝶蘭葉片對於溫度的敏感性，利用光合作用分析儀在大型生長箱內進行日變化量測，以 12 h 為日夜時間間距，光度以 LED 光源 500 μmol quanta m^{-2} s^{-1}，6 種日/夜溫度組合，20/15℃，20/20℃，25/20℃，25/25℃，30/25℃及 30/30℃。由 Fig. 1 不同溫度組合之 CO_2 通量變化資料，日溫(30℃)促使呼吸作用增加，二氧化碳通量約為 -1 μmol CO_2 m^{-2} s^{-1}。夜溫 25℃但日溫 30℃之組合，和日溫/夜溫同為 25℃相較，夜間固碳量明顯下降，顯然日溫影響夜間固碳作用，而夜溫過低(15℃)也直接影響固碳

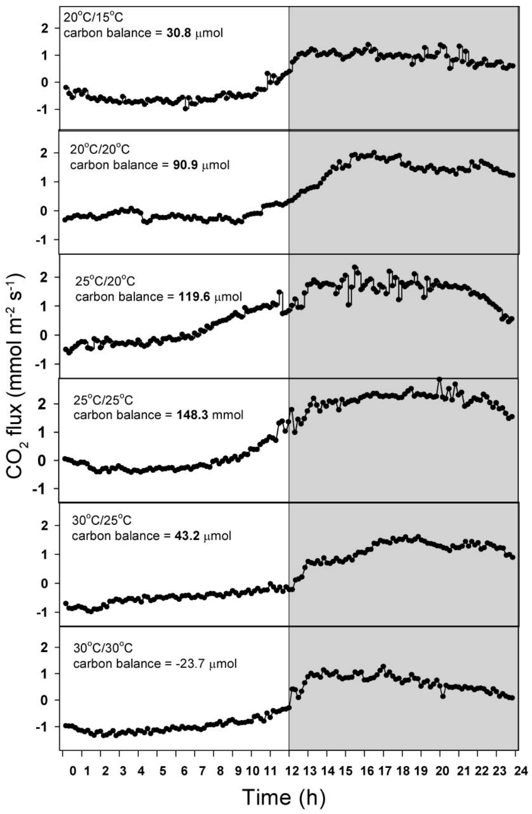

Fig. 1. Effect of day/night temperature on the carbon flux and daily carbon balance for leaves of *Phalaenopsis*. Plants were treated at day-length of 12 hours under 500 μmol m^{-2} s^{-1}.

量。為瞭解整日碳吸收及排放之淨值，碳平衡數值顯示，25/25℃的組合可得到 148.3 μmol 最高之吸收淨量，其次為 25/20℃，至於溫度過高或過低的碳平衡數值偏低，尤其 30/30℃組合碳平衡為負值，說明在此溫度組合下，蝴蝶蘭葉片夜間所合成碳水化合物不夠日間呼吸作用消耗。

太陽輻射提供 CAM 型作物葉片行光反應，以供夜間固碳所需能量。本研究利用 LED 光源控制光度，分別以 100, 200, 500 及 800 μmol m^{-2} s^{-1}，探討蝴蝶蘭葉片對光度反應。由 Fig. 2 結果顯示，500 μmol m^{-2} s^{-1} 照光 12 h 處理可得碳平衡淨值最高，高光處理(800 μmol m^{-2} s^{-1})反而只有 98.6 μmol CO_2 d^{-1}，而光照低至 100 μmol m^{-2} s^{-1} 則碳平衡淨值為負值，說明低光之光反應不足以提供暗反應所需之能量。不同光照週期對於蝴蝶蘭葉片碳平衡之影響如 Fig. 3 所示，明暗期同為 12 h，可得最高碳平衡淨值 148.3 μmol CO_2 d^{-1}，明暗週期較短，碳平衡的淨值越低，6 h 週期為 127.1 μmol CO_2 d^{-1}，4 h 週期為 92.4 μmol CO_2 d^{-1}。

植物光合作用胞器內天線(antenna)色素吸收太陽可視光線，光所激發能量經由兩個光系統(PSI 及 PSII)由光能轉為化學能，葉片受光所激發能量除光化學外，可透過螢光及熱將過多能量排於植體外。葉綠素螢光參數 qP 是由 Fm'分別扣減光照及黑暗下最低螢光量的比值，表示固定光強下，光量子產量的比值。qN 是指能量非用於光化學的部分，一般是以螢光及熱的方式釋放。Fig. 4 資料顯示，低光時以 qP 為主，光量子產量(yield)也高，另由 qN 偏低也可說明，低光時葉片對光的利用效率高，但也因光照低使電子傳遞速率(ETR)較低。光照在 300 至 500 μmol m^{-2} s^{-1} 間光能使用效率逐漸平衡，700 μmol m^{-2} s^{-1} 之後則 qN 昇高，表示開始有高光之逆境產生。由螢光參數量測結果說明，蝴蝶蘭葉片適合光度應在 300-500 μmol m^{-2} s^{-1} 之間。

通量系統是以整個蘭園溫室為量測尺

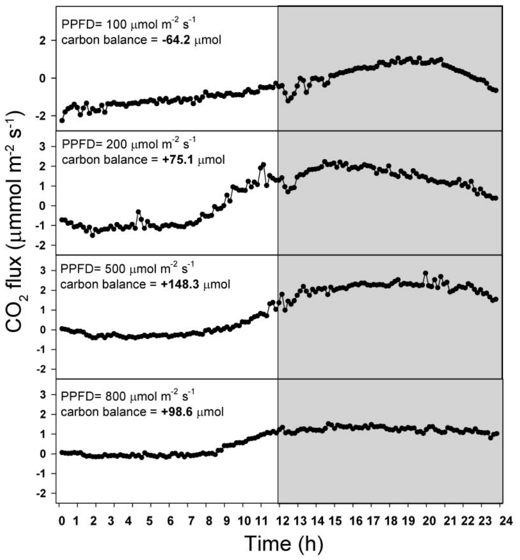

Fig. 2. Effect of light intensity on the carbon flux and daily carbon balance for leaves of *Phalaenopsis*. Plants were treated at day-length of 12 hours under day/night temperature 25/25℃. PPFD: photosynthetically photon flux density, μmol m^{-2} s^{-1}.

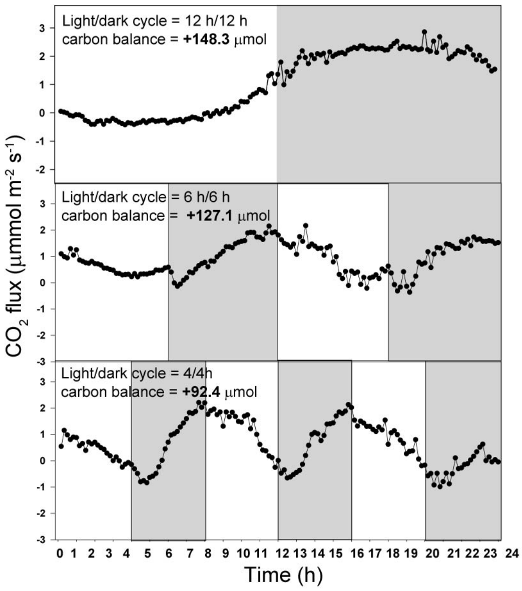

Fig. 3. Effect of daylength on the carbon flux and daily carbon balance for *Phalaenopsis* leaves. Plants was under 500 μ mol m^{-2} s^{-1} and day/night temperature 25/25℃.

度，二氧化碳包括葉片固碳作用及葉、根部之呼吸作用，潛熱通量(latent heat flux)除植株蒸發散量外，也包括因風扇對水牆產生之水汽拉力。基本上，溫室內通量變化較農田複雜且不穩定，但由 Fig. 5 蝴蝶蘭園日變化仍能反應 CAM 型作物生理變化，即夜間行固碳反應，二氧化碳通量為正值，而當白天蝴蝶蘭葉片氣孔關閉，僅葉片及根部呼吸作用時，二氧化碳通量接近零或為負值，由於通量系統設定為 10 min 一筆平均值，數值間變異較大，但若取小時平均資料或由迴歸線，即可瞭解日變化趨勢。溫度影響蝴蝶蘭呼吸作用及固碳作用，Fig. 6 分別為日溫與呼吸作用及夜溫與固碳作用之相關性。呼吸作用與溫度呈函數關係，溫室在日間為降溫而驅動水牆及風扇，蝴蝶蘭群落上方的二氧化碳受到風扇擾動，雖然溫度與二氧化碳通量呈負相關，但相關係數僅為-0.45；夜間一般風扇較少啟動，夜溫與蝴蝶蘭葉片固碳能力之關係較顯著，相關係數為正值 0.62。由於通量系統在商業用溫室內量測，一般溫度控制在 30℃以內，夜溫也鮮少超過 28℃。由 Fig. 6 資料顯示，夜溫在 26℃以上，出現低二氧化碳通量數值的頻率增加，代表此應為適溫與高溫逆境間的轉折點。Fig. 7 為蝴蝶蘭園碳平衡與日均溫之周年變化，較高碳平衡淨值發生在 24-28℃之間。

分析蝴蝶蘭園周年資料，探討氣象通量與氣象環境間(氣溫及光照)之關係如 Table 1。潛熱通量是蘭園蒸發散量之實測值，日間潛熱與光照之相關性較顯著(r=0.38**)，夜間則與其他氣象因素間相關性不顯著。夜間固碳能力與日溫及夜溫之相關係數皆達正值 0.60 以上。光照和日間吸呼作用呈負相關，但和夜間二氧化碳通量相關係數僅為 0.18*。

討論

渦流系統量測對於環境條件的要求甚為嚴格，其中以量測田區吹風距離(fetch)的影響最為重要。所謂吹風距離是指作物植冠所形成的觀測面積，一般認為比值應為 100：1 較適當(Rosenberg *et al.* 1983)，可避免植冠非均一性及風向的干擾；也就是植株高度若

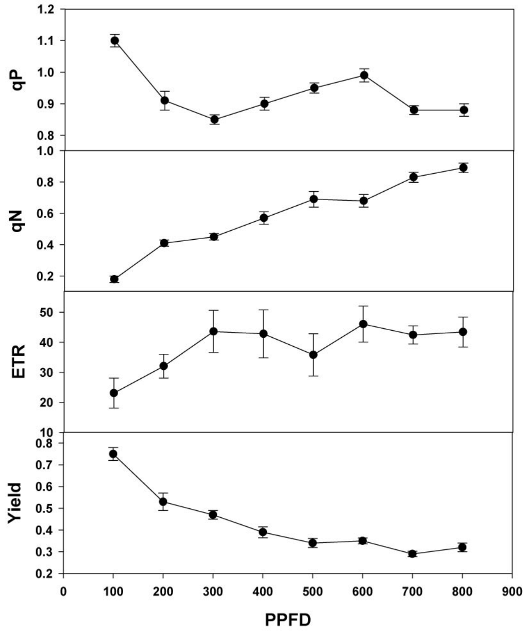

Fig. 4. Changes of chlorophyll fluorescence parameters under different light intensity for leaves of *Phalaenopsis*. qP: photochemical quenching; qN: non-photochemical quenching; ETR: electron transfer rate; Yield: photochemical yield; PPFD: photosynthetically photon flux density, μmol m^{-2} s^{-1}.

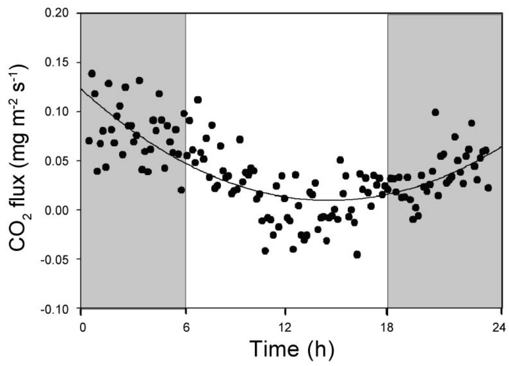

Fig. 5. Changes of CO_2 flux in orchid field on the calendar date 72 in 2007.

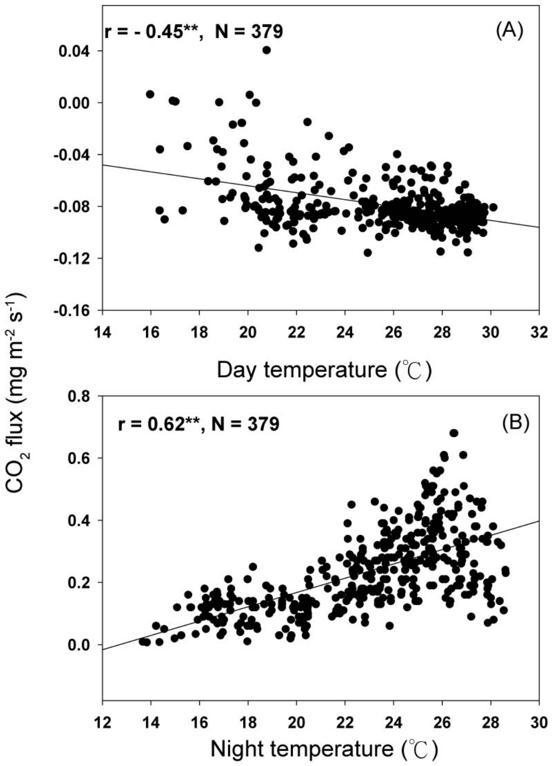

Fig. 6. Linear relationship between CO_2 flux and day (A) and night (B) temperature in the orchid of *Phalaenopsis*.

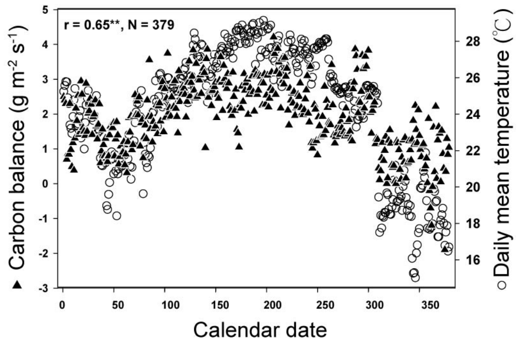

Fig. 7. Changes of carbon balance and daily mean temperature from calendar date 351, 2006 to calendar date 365, 2007.

為 1 m，則以觀測點為中心，半徑 100 m 之圓面積需為平整之觀測面。不同觀測狀況所需的吹風距離不盡相同，有些學者認為吹風距離比值不需過大，Heilman *et al.* (1989)以多組通量感測器放置在不同高度及吹風距離，以量測蒸散旺盛之牧草及棉花田，結果認為吹風距離比值至 20:1 的準確性仍可接受。本研究量測目標為常見之蝴蝶蘭塑膠布溫室，通量系統架設於溫室中央，吹風距離寬為 25:1，長為 90:1，是可符合最低吹風距離之標準。

Table 1. Correlation coefficients of the CO_2 and latent heat flux with micrometeorological data measured in the greenhouse growing *Phalaenopsis*.

Item	FC-D[x]	LE-D	Temp-D	PPFD	FC-N	LE-N	Temp-N
FC-D	1	-0.11*[y]	-0.45**	-0.36**	-0.23**	0.06	-0.42**
LE-D		1	0.28**	0.38**	0.30**	-0.14*	0.30**
Temp-D			1	0.13*	0.64**	-0.20*	0.95**
PPFD				1	0.18*	-0.14*	0.06
FC-N					1	-0.14*	0.63**
LE-N						1	-0.16*
Temp-N							1

[x] FC-D: daytime CO_2 emission (μmol m^{-2} s^{-1}); LE-D: daytime latent heat flux (W m^{-2}); Temp-D: daytime air temperature (℃); PPFD: photosynthetically photon flux density (μmol m^{-2} s^{-1}); FC-N：nighttime CO_2 fixation (μmol m^{-2} s^{-1}); LE-N: nighttime latent heat flux (W m^{-2}); Temp-N: nighttime air temperature (℃).

[y] Significant at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively, according to the analysis of two-tailed t test.

通量系統可用於農田碳循環的研究，但農田與蘭園在栽培環境上有截然不同的差異，包括土壤因素在蘭園重要性較低，但溫室環境因降溫設備的使用，氣象環境較大面積農田較不穩定。過去蝴蝶蘭生理研究著重於夜間固碳能力的探討，但日間呼吸作用對於蘭園管理也是重點，因日間呼吸作用若過高將消耗夜間光合產物。Heinemann *et al.* (2006)認為氣候變遷對作物生長影響即是夜溫昇高使作物呼吸速率加速，消耗作物日間所累積之碳水化合物所致。本研究中日夜溫為30/30℃對蝴蝶蘭葉片碳平衡為負值(Fig. 1)，夜間雖仍有固碳作用進行，但日間呼吸作用將夜間固定量消耗殆盡。另低光(100 μmol m^{-2} s^{-1})不足以提供夜間暗反應所需能量亦為負值(Fig. 2)，由日夜碳平衡淨值較能反應蝴蝶蘭生長情形。

CAM 植物固碳作用研究困難處在於夜間才有 CO_2 的吸收，利用微氣象方法在不影響環境情況下，以非破壞性及長期監測方式探討固碳能力或碳平衡是值得嘗試的方法。San-Jose *et al.* (2007)曾利用通量量測方式監測 CAM 型作物鳳梨 [*Ananas comosus* (L.)]，利用二氧化碳通量表示作物生產力，潛熱通量則作為需水量評估及灌溉決策依據，此種微氣象量測方式適度解決 CAM 植物在量測上的限制。本研究將通量技術導入蝴蝶蘭園溫室內量測，希望解決蝴蝶蘭此種重要花卉作物生理監測之問題。溫室內微氣象迥異於大氣環境，同時降溫設備運作會干擾通量量測結果。一般而言，日間潛熱直接受光照影響，兩者相關係數在玉米田及水稻田可達 0.70 以上(Yao *et al.* 2009)。但由 Table1 周年資料分析結果，溫室內潛熱及光照之相關性雖達顯著水準，但相關係數僅為 0.38，可能原因為溫室內水牆水汽加上風扇驅動而干擾蝴蝶蘭蒸發散作用。因此，具水牆風扇溫室之水分狀態不宜用潛熱通量量測。由 Fig. 5 日變化數據說明二氧化碳通量是符合蝴蝶蘭生育特性，日夜變化明顯；而由 Fig. 7 碳平衡及日均溫之周年資料，兩者相關係數可達 0.65，也就是二氧化碳通量可作為溫室蝴蝶蘭生長之監測工具。

CAM 植物由於生理特性較為特殊，同時並非主要糧食作物，因此在生理反應及監測技術的研究較 C_3 或 C_4 型作物少，尤其是研究尺度間之差異比較、大面積監測及缺水及熱逆境的相關研究(Luttge 2004)。雖然不同物種或品種間有差異存在，一般將 CAM 作物 CO_2 同化過程分為四種階段(Osmond 1978)。Lee and Kim (2006)比較 9 種景天科作物，發現物種間之光合作用速率差異極大，高者可達 13.0 μmol CO_2 kg^{-1} s^{-1}，低者僅 2.4 μmol CO_2 kg^{-1} s^{-1}。蝴蝶蘭光合作用速率差異除物種本身遺傳特性外，葉片生育階段及環境影響因素。Guo and Lee (2006)指出蝴蝶蘭不同葉位之光合作用速率，約在 2-6 μmol CO_2 m^{-2} s^{-1} 之間，其中新葉及初成熟葉片固碳能力最強，成熟葉片較低，但因植株以成熟葉片居多，本研究蝴蝶蘭葉片各項生理量測仍以成熟葉片為主，光合作用速率約在 2-3 μmol CO_2 m^{-2} s^{-1} (Figs. 1-3)。

Table 1 資料說明蝴蝶蘭葉片夜間固碳反應受溫度影響最明顯，包括日溫及夜溫的相關係數皆在 0.60 以上，至於日溫與日間二氧化碳通量(呼吸作用)也達顯著水準(Fig. 6)。但蝴蝶蘭生育最適溫度是最受關注的問題，在不同環境、生育階段及品種有不同的結論，舉例而言，Lootens and Heursel (1998)指出蝴蝶蘭幼苗在 20/15℃之日累積 CO_2 吸收量高於 25/20℃及 25/25℃。Guo and Lee (2006)發現蝴蝶蘭葉片在 32/28℃或 29/25℃，均較 25/20℃或 21/16℃有較高 CO_2 吸收。Lin and Lee (1998)之試驗顯示蝴蝶蘭雜交品種需要較高溫度，以使生長快速及葉面積增大，而低日溫及高夜溫明顯限制營養生長。Ota *et al.* (1991)比較不同日/夜溫組合，在日溫相同為 25℃，夜溫 15℃較 25℃在暗期吸收 CO_2 為高；而在夜溫同為 15℃，日溫 25℃則較 15℃在夜間有更多 CO_2 的吸收。本研究以碳平衡為指標，發現成熟葉片之日/夜溫為 25/25℃可得到最大 CO_2 淨值(Fig. 1)，而由大尺度之

蘭園周年通量資料，較高之碳平衡淨值分佈在日均溫為 24-28℃間(Fig. 7)，而由 Fig. 6 夜溫與二氧化碳通量的關係，超過 27℃二氧化碳通量開始下降。因此，以蘭園尺度而言，24-27℃應為最佳溫度控制範圍。

蝴蝶蘭光飽和點同樣有不同結論，文獻資料如 130 μmol m^{-2} s^{-1} (Ota *et al.* 1991)或 180 μmol m^{-2} s^{-1} (Lootens and Heursel 1998)，臺灣大學李哖教授(個人通信)則認為約在 200 μmol m^{-2} s^{-1}。光照至 325-450 μmol m^{-1} s^{-1}雖不影響吸收 CO_2能力及夜間碳固定能力，但光反應速率已顯著受到光抑制(photoinhibition)，超過 450 μmol m^{-1} s^{-1}，Fv/Fm 值降至 0.68，光傷害發生(Guo 1999)。以氧電極分析朵麗蝶蘭(*Doritaenopsis*)葉圓片所得到之光飽和點可達 1,050 μmol m^{-1} s^{-1} (Ota *et al.* 2001)。本研究由成熟單葉在光照為 500 μmol 時有最大碳平衡淨值(Fig. 2)，而由螢光參數量測結果，700 μmol m^{-1} s^{-1}開始有高光之逆境產生(Fig. 4)。但由蘭園尺度分析結果，光照與夜間固碳能力之相關性並不顯著。由於蝴蝶蘭上下葉位之受光量差異極大，下位葉僅能吸收弱光或散射光。因此，光照增高有利於下位葉在高光下吸收更多 CO_2 (Suto 1993)，但以整體蘭園角度，關於蝴蝶蘭植株之生長最佳光照範圍，本研究中利用通量方式並無法得到答案。主要是蘭園光環境是波動而非固定，葉片行固碳作用發生在夜間，光反應與暗反應非同步。CAM 型植物飽和光照曲線雖可用葉片酸量或蘋果酸(malate)含量作量測(Nobel and Hartsock 1983)，但僅限於單葉，且為破壞性分析，仍無法解決單株或整個蘭園需光量的問題，未來仍需更近一步的研究。光照與夜間固碳作用間之關係亦受其他因素影響，Lootens and Heursel (1998)評估兩種蝴蝶蘭雜交種，高溫(25&30℃)較低溫(20℃)有較高之光量子效率，而高溫至 300 μmol m^{-1} s^{-1}仍未飽和。大氣中二氧化碳濃度影響光飽和點，當二氧化碳濃度為 2,000 ppm 時，處理光照為 500 μmol m^{-1} s^{-1}才達到飽和(Ichihashi *et al.* 2008)。除光照影響蝴蝶蘭固碳作用外，照光時間(或週期)對整體碳平衡淨值的影響為何？Guo (1999)研究蝴蝶蘭之 CO_2吸收日韻律(diurnal CO_2 uptake)，分別比較日長 8,12 及 16 h 之 CO_2吸收量，發現 12 h 吸收淨值最高，其次是 16 h，最少為 8 h。本研究以一日內包含 1, 2 及 3 個明暗周期作探討(Fig. 3)，發現照光 12 h 仍是能固定最高 CO_2量之處理，明暗周期數越大對 CO_2吸收淨值越低，以 4 h 週期為例，光照時間不夠長將影響暗期之固碳作用，在第三次暗期已無固碳能力。

過去研究對於蝴蝶蘭最適溫度及光照之結論不同，差異原因可歸類多種因素，但量測尺度不同應是重要因素。本研究嘗試將通量技術導入溫室氣象環境的監測，以實際蘭園栽培狀態作為研究對象，探討整個蘭園尺度之控制溫度及光照範圍。研究結果顯示，溫度可得到明確結論，但光照則肇因於 CAM 作物特殊生理特性，雖然由葉片碳平衡及葉綠素螢光參數得到最適光照範圍，但難以建立蘭園尺度之日間光照與夜間固碳作用相關性。至於蘭園量測潛熱通量(蒸發散量)以作為水分管理的企圖，仍因水牆風扇影響溫室內水汽狀態而受阻。但二氧化碳通量仍可作為蝴蝶蘭生理研究及長期監測的工具，尤其碳平衡觀念有助於蘭園呼吸作用及固碳作用整體評估的工具，將有助於未來蝴蝶蘭生長模式及蘭園最佳化管理流程之建立。

引用文獻

Amiro B (2010) Estimating annual carbon dioxide eddy fluxes using open-path analysers for cold forest sites. **Agric. For. Meteorol.** 150:1366-1372.

Borkowska B (2006) Chlorophyll a fluorescence method as a physiological marker of plant response to light stress and endo-mycorrhiza (AMF). **Acta Horticul.** 711:177-182.

Field CB, JR Ehleringer (1993) Introduction: question of scale. p.1-4. *In*: Scaling Physiological Processes. Leaf to Globe. JR Ehleringer, CB Field (*eds.*) Academic press Inc., New York.

Genty B, J Briabtais, N Baker (1989) The relationship between the quantum yield of photosynthetic electron transport and quenching of chlorophyll fluorescence. **Biochim. Biophys. Acta** 990:87-92.

Guo WJ (1999) A study on characteristic of photosynthesis in *Phalaenopsis*. MS thesis. Dept. of Horticulture, National Taiwan Univ., Taipei, Taiwan.

Guo WJ, N Lee (2006) Effect of leaf and plant age, and day/night temperature on net CO_2 uptake in *Phalaenopsis amabilis* var. *formosa*. **J. Amer. Soc. Sci.** 131:320-326.

Heilman JL, CL Brittin, CMU Neale (1989) Fetch requirements for Bowen ratio measurements of latent and sensible heat flux. **Agric. For. Meteorol.** 44:261-273.

Heinemann AB, HN Maia, DN Durval, KT Ingram, H Gerrit (2006) Soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] growth and development response to CO_2 enrichment under different temperature regimes. **Europ. J. Agron.** 24:52-61.

Ichihashi S, T Higuchi, H Shibayama, Y Tesima, Y Nishiwaki, K Ota (2008) Aspects of CO_2 uptake in the crassulacean acid metabolism orchid *Phalaenopsis*. **Acta Hort.** 766:245-256.

Lee SD, SJ Kim (2006) Diurnal CO_2 assimilation patterns in nine species of CAM-type succulent plants. **HortScience** 41:1373-1376.

Lin MJ, BD Hsu (2004) Photosynthetic plasticity of *Phalaenopsis* in response to different light environment. **J. Plant Physiol.** 161:1259-1268.

Lin YZ, N Lee (1998) Light requirement of *Phalaenopsis* during prior to and following cool-temperature forcing. (in Chinese with English abstract) **J. Chinese Soc. Hort. Sci.** 44:463-478.

Lootens P, J Heursel (1988) Irradiance, temperature and carbon dioxide enrichment affect photosynthesis in *Phalaenopsis* hybrids. **HortScience** 33:1183-1185.

Luttge U (2004) Ecophysiology of crassulacean acid metabolism (CAM). **Ann. Bot.** 93:629-652.

McGinn SM, KM King (1990) Simultaneous measurement of heat, water vapour and CO_2 fluxes above alfalfa and maize. **Agric. For. Meteorol.** 49:331-349.

Nobel PS, TL Hartsock (1983) Relationships between photosynthetically active radiation, nocturnal acid metabolism, and CO_2 uptake for a crassulacean acid metabolism, *Opuntia ficus-indica*. **Plant Physiol.** 71:71-75.

Ortega-Farias SO, A Olioso, S Fuentes, H Valdes (2006) Latent heat flux over a furrow-irrigated tomato crop using Penman-Monteith equation with a variable surface canopy resistance. **Agric. Water Manage.** 3:421-432.

Osmond CB (1978) Crassulacean acid metabolism: A curiosity in context. **Ann. Rev. Plant Physiol.** 29:379-414.

Ota K, K Morioka, Y Yamamoto (1991) Effects of leaf age, inflorescence, temperature, light intensity, and moisture conditions on CAM photosynthesis in *phalaenopsis*. **J. Jpn. Soc. Hort. Sci.** 60:125-132.

Ota, K, T Ono, S Ichihashi (2001) Characteristics of CAM photosynthesis in light phase measured by O_2-electrode method in *Doritaenopsis*. p.206-207. *In*: Proc. 7th APOC. H Nagata, S Ichihashi (eds.) Nagoya, Japan.

Roháček K (2002) Chlorophyll fluorescence parameters: the definitions, photosynthetic meaning, and mutual relationships. **Photosynth. Res.** 40:13-29.

Rosenberg NJ, BL Blad, SB Verma (1983) Microclimate: The Biological Environment. 2nd ed. John Wiley and Sons. New York. 495pp.

San-Jose J, R Montes, N Nikonova (2007) Diurnal patterns of carbon dioxide, water vapour, and energy fluxes in pineapple [*Ananas comosus* (L.) Merr. cv. Red Spanish] field using eddy covariance. **Photosynthetica** 45:370-384.

Silva J, R Santos (2004) Can chlorophyll fluorescence be used to estimate photosynthetic production in the *seagrass Zostera noltii*？ **J. Exp. Marine Biol**. **Ecol**. 307: 207-216.

Suto K (1993) Effect of light on the CO_2 metabolism in *Phalaenopsis*. **J. Jpn Soc. Hort. Sci**. 62:380-381.

Yao MH, JC Tsai, LS Liang (2003) Measurement of vertical profiles and fluctuations on agrometeorological factor within and above a rice canopy. (in Chinese with English Abstract) **J. Taiwan Agric. Res.** 52:50-61.

Yao MH, SH Chen, CJ Liu (2009) Relations of carbon dioxide and water vapour flux to meteorological factors in agricultural fields. (in Chinese with English abstract) **Crop, Environ. Bioinform.** 6:185-192.

Zhang BZ, SZ Kang, L Zhang, TS Du, SE Li, XY Yang (2007) Estimation of seasonal crop water consumption in a vineyard using Bowen ratio-energy balance method. **Hydrol. Process.** 21:3635-3641.

－編輯：楊純明